

轻型木结构房屋动力特性测试及研究

熊海贝, 康加华, 吕西林

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 对国内第一所轻型木结构小学的三栋单体校舍动力特性进行了实测, 并结合试验研究成果及国外文献调查结果, 对轻型木结构房屋自振周期及阻尼比进行研究. 研究发现轻型木结构房屋中石膏板参与结构耗能, 同时提高结构的初始刚度; 轻型木结构房屋阻尼比测试值与结构经历的振动幅值有关, 振动幅值越大, 测得的阻尼比也越大; 利用实际地震记录、模拟地震振动台试验以及房屋受迫振动等方法测得的轻型木结构房屋阻尼比都接近或大于 5% 的规范建议值; 研究验证了《轻型木结构建筑技术规程》对于 3 层及以下轻型木结构房屋的地震影响系数 α 取最大值的合理性.

关键词: 轻型木结构房屋; 自振周期; 阻尼比; 地震影响系数; 动力特性实测

中图分类号: TU 366.2

文献标识码: A

Test and Investigation on Dynamic Characteristics of Wood-frame Constructions

XIONG Haibei, KANG Jiahua, LU Xilin

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Field tests were performed on three wood-frame constructions in order to get their dynamic characteristics. Data obtained from the field tests, laboratory tests and literatures review were used to investigate the fundamental period and damping ratio of the wood-frame construction. Results show that gypsum board can not only dissipate the input earthquake energy but also increase structural stiffness. The damping ratio of wood-frame constructions is related to the amplitude of vibration, high damping ratio can be obtained depended on large amplitude vibration. The damping ratios of wood-framed construction obtained from earthquake records, shaking table tests, and forced vibration are close to or larger than 5% the value recommended in the code. And it is also confirmed that the earthquake coefficient of wood-frame

constructions to be proposed to adopt the maximum value of the earthquake response spectrum curve in the Technical Specification of Wood-frame Construction is reasonable.

Key words: wood-frame construction; fundamental period; damping ratio; seismic effect coefficient; field test on dynamic characteristics

近年来北美轻型木结构建筑以其节能、绿色环保、建设周期短、抗震性能良好等符合现代建筑标准的特点进入中国建筑市场.《木结构设计规范》(B50005-2003)^[1]也增加了轻型木结构相应部分的规范条款. 同济大学与加拿大林产工业技术研究院自 2004 年起合作进行了一系列轻型木结构房屋足尺模型的振动台试验、低周反复加载试验和部分木框架剪力墙静力试验, 部分研究成果已经应用于上海市工程建设规范《轻型木结构建筑技术规程》(DG/TJ08-2059-2009)^[2], 该技术规程已于 2009 年 9 月 1 日起开始实行. 2008 年 5 月 12 日四川汶川大地震过后, 由同济大学倡议发起在四川都江堰市向峨乡用轻型木结构建筑重建向峨小学, 经过一年多设计与施工, 该小学已于 2009 年 8 月 26 日正式投入使用. 这是中国第一所采用轻型木结构建造的小学, 为中国提高中小学校舍抗震设防标准提供了一个从建筑材料角度解决问题的示范性工程. 然而国内有关轻型木结构的研究相对缺乏, 现阶段关于轻型木结构房屋的一些规范都参考了北美地区的相关标准.

在对向峨小学轻型木结构校舍动力特性现场测试的基础上, 结合同济大学土木工程防灾国家重点实验室轻型木结构模拟地震振动台试验研究成果^[3-5]及相关国外文献的调查研究, 对轻型木结构

收稿日期: 2010-02-11

基金项目: 绿色节能可持续建筑体系的研究和成套技术开发示范项目(2008DFA71990)

第一作者: 熊海贝(1964—)女, 教授, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构、现代木结构及混合结构的抗震性能. E-mail: xionghaibei@126.com

的自振周期及阻尼比进行了一些初步讨论,本文工作是文献[5]研究的继续和拓展.

轻型木结构房屋水平地震力计算采用底部剪力法,该方法首先需确定结构基本自振周期和阻尼比,规范^[1]规定轻型木结构自振周期按公式为 $T = 0.05 H^{3/4}$. T 为结构基本自振周期(单位:s), H 为基础顶面到建筑物最高点的距离(单位:m),阻尼比取 5%. 虽然引进了北美地区轻型木结构规范,但是国内有关轻型木结构房屋的研究并不多,特别是结构动力特性(周期及阻尼比)方面的调查与研究.

1 规范建议的轻型木结构自振周期计算公式及阻尼比

美国加州地区规范 UBC^[6]规定轻型木结构房屋基本自振周期采用如下公式估算,即

$$T = C_t H_n^{3/4}$$

式中:常数 $C_t = 0.020$; H_n 为基础顶到房屋最高点的距离(单位:ft). ASCE/SEI7 - 05^[7] 和加拿大规范^[8]都采用 UBC^[6]中的周期计算公式,加拿大规范^[8]中 H_n 单位为 m,因此 $C_t = 0.050$. 此外,FEMA - 273^[9]中的 3.3 节部分也提供了轻型木结构自振周期的计算公式,形式与 UBC^[6]中提供的公式相同,也采用相同的单位制度,只是 $C_t = 0.06$,为 UBC^[6]中 C_t 值的 3 倍.FEMA - 273^[9]也将数值计算列为了计算结构自振周期的方法之一.《木结构设计规范》^[1]中自振周期计算公式与加拿大规范^[8]相似.《轻型木结构建筑技术规程》^[2]在同济大学土木工程防灾国家重点实验室对轻型木结构房屋足尺模型模拟地震振动台试验研究成果基础上^[5]直接规定相应于结构基本周期的水平地震影响系数取相应抗震设防烈度下的最大值.

《木结构设计规范》^[1],《轻型木结构建筑技术规程》^[2],UBC^[6]及 FEMA - 302^[10]都规定轻型木结构房屋的阻尼比取 5%.

2 向峨小学轻型木结构校舍动力特性实测

2.1 向峨小学工程简介

向峨小学是 5.12 汶川地震后的重建工程,由同济大学倡议发起,见图 1. 该工程位于都江堰市向峨乡,根据国家标准 GB 18306—2001《中国地震动参

数区划图》第 1 号修改单的要求,场地设防烈度为 8 度,地面加速度 0.20 g,特征周期 0.40 s,学校建筑为乙类建筑.学校共设有教学综合楼、宿舍楼和餐厅三个单体建筑,均采用轻型木结构体系.房屋结构由墙体、楼盖和屋盖三部分组成.楼盖/屋盖采用工字型搁栅或木桁架、剪刀撑和定向刨花板组成;墙体采用规格材组成的框架覆以定向刨花板形成木框架剪力墙,以承受水平及竖向荷载.三栋建筑的平面尺寸及高度见表 1,三栋建筑二层木框架剪力墙(阴影部分)平面布置见图 2~4.

表 1 向峨小学教学综合楼、宿舍楼、餐厅结构信息汇总表
Tab.1 Structural information of Xiang'e Elementary School

校舍名称	平面尺寸/m×m	层高/m	层数/层	屋脊高度/m
教学综合楼	1 区 52.8×9.9	3.6	2	11.05
	2 区 43.5×16.8	3.6	2	11.05
	3 区 32.8×10.4	3.6	2	11.05
宿舍楼	26.6×16	3.6	3	14.39
餐厅	24×16.24	—	局部 2	11.00



图 1 校园整体效果图
Fig.1 Overview of Xiang'e Elementary School

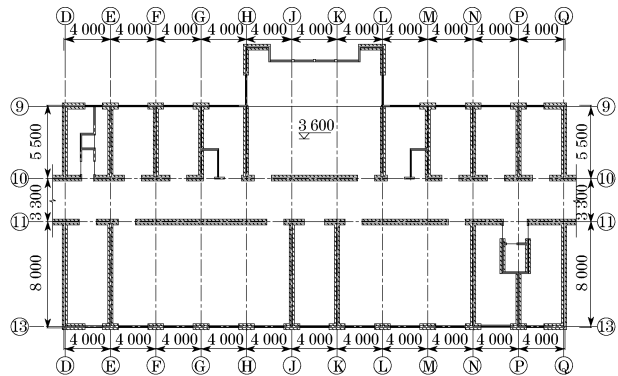


图 2 教学楼 2 区二层剪力墙平面布置图(单位:mm)
Fig.2 Shear wall layout on second floor of school house (unit:mm)

2.2 测试原理

现场动力测试采用同济大学自主研发的 SVSA

动态信号采集分析系统,在环境脉动作用下记录结构纵向和横向加速度时程.由功率谱上的峰值,采用 1 024 点分析,使用半功率点法进行阻尼识别.通过 SVSA 分析软件进行数据分析获得结构各阶自振频率及相应的阻尼比.

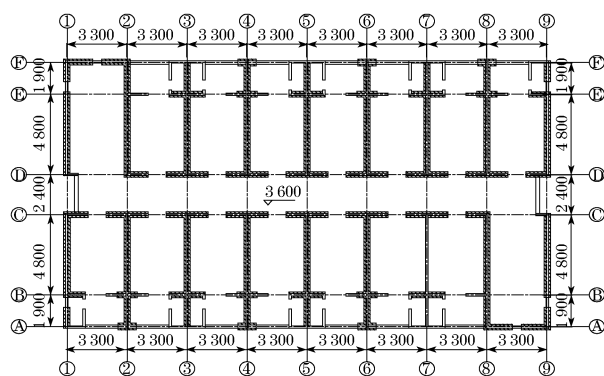


图 3 宿舍楼二层剪力墙平面布置图(单位:mm)

Fig.3 Shear wall layout on second floor of dormitory (unit:mm)

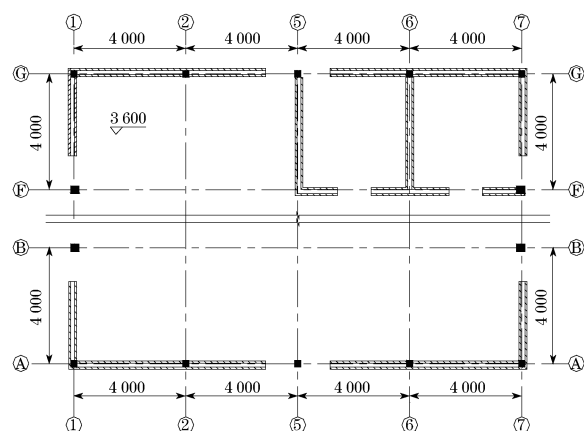


图 4 餐厅二层剪力墙平面布置图(单位:mm)

Fig.4 Shear wall layout on second floor of cafe (unit:mm)

2.3 测试结果

向峨小学三栋单体校舍建筑结构平面布置规则,故测点布置于结构平面的中心,图 5 是宿舍楼测试沿房屋横向和纵向加速度测点布置,该测点位于三层走廊地面.

图 6 和图 7 是宿舍楼纵向和横向加速度计在环境脉动作用下记录的房屋纵向和横向加速度功率谱,从图上可以得到宿舍楼振动频率及阻尼比等参数.表 2 列出了本次测试的三栋轻型木结构单体校舍建筑动力特性参数及按规范^[1]计算公式得到的结构自振周期.

现场脉动测试结果表明,实测的结构自振周期值明显小于规范^[1]建议的自振周期计算公式计算

值,脉动测试得到的结构阻尼比小于规范^[1]建议值 5%.规范公式虽然不能准确估算结构的自振周期,但是根据规范公式或实测结果,地震影响系数的取值并没有变化.



图 5 纵向和横向测点布置

Fig.5 Layout of acceleration transducer

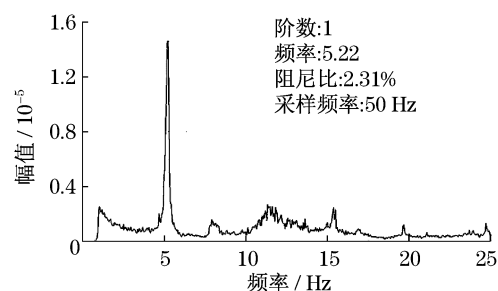


图 6 宿舍楼纵向测点加速度功率谱

Fig.6 Longitudinal power spectrum

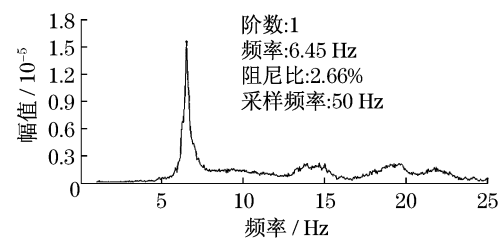


图 7 宿舍楼横向测点加速度功率谱

Fig.7 Transverse power spectrum

3 轻型木结构房屋动力特性实验室研究成果

同济大学从 2004 年开始与加拿大国家林产工业技术研究院开始了系列的轻型木结构房屋研究,至今进行了多次轻型木结构房屋足尺模型(高 6.3 m)振动台试验,得到了不同峰值加速度下结构的自振周期^[3-4],试验结果见表 3.表中 1-3 号房屋外墙内侧有石膏板,内墙两侧亦都覆有石膏板,4-5 号房

表 2 向峨小学校舍动力特性实测值
Tab.2 Summary of field test results of Xiang'e Elementary School

校舍名称		工况	一阶振动 周期/s	阻尼 比/%	方向	二阶振动 周期/s	阻尼 比/%	方向	规范 值/s
教学 综合 楼	1 区	正常使用	0.14	3.06	纵向	0.14	2.32	横向	0.30
		无人	0.15	1.21	纵向	0.14	1.74	横向	
	2 区	正常使用	0.15	2.14	纵向	0.12	3.10	横向	
		无人	0.15	3.94	纵向	0.12	3.42	横向	
	3 区	正常使用	0.15	3.44	纵向	0.13	1.41	横向	
		无人	0.15	4.34	纵向	0.12	3.21	横向	
宿舍楼		无人	0.19	2.31	纵向	0.16	2.66	横向	0.37
餐厅		无人	0.18	0.52	横向	0.16	1.79	纵向	0.30

表 3 轻型木结构房屋动力特性实验室测试值^[3-4]

Tab.3 Summary of dynamic characteristics of wood-frame constructions obtained from laboratory tests^[3-4]

房屋 编号	房屋高 度/m	峰值加 速度/g	自振周 期/s	阻尼 比/%
1		0	0.23	2.4
		0.1	0.23	2.4
		0.2	0.23	2.4
		0.4	0.24	3.9
2		0	0.24	4.0
		0.1	0.24	4.6
		0.2	0.26	6.7
		0.4	0.28	8.8
3	6.3	0	0.27	6.5
		0.1	0.28	6.1
		0.2	0.30	8.1
		0.4	0.41	11.6
4		0	0.28	—
		0.1	0.28	—
		0.2	0.32	—
		0.4	0.86	—
5		0	0.31	—
		0.1	0.32	—
		0.2	0.39	—
		0.4	0.89	—

屋墙体上没有石膏板.1 号房屋为完全新建的模型,而 2 号和 3 号房屋是 1 号房屋经修复改造所得.

文献[5]研究了文献[3-4]中轻型木基结构相关的动力特性试验成果,提出了对于适用于中国的 3 层及以下轻型木结构房屋的地震影响系数直接取相应抗震设防烈度最大值的设计方法,而无需采用仅与房屋高度有关的周期计算确定的方法.该方法已

经应用于《轻型木结构建筑技术规程》^[2].

表 4 轻型木结构房屋动力特性调查 1^[12]

Tab.4 Summary of dynamic characteristics of wood-frame constructions from literature review^[12]

房屋高 度/m	自振周 期/s	阻尼 比/%	测试 方式	峰值加 速度/g
9.1	0.22	11.8	地震 记录	0.092
4.0	0.14	11.2		0.201
5.2	0.18	7.0		0.044
4.3	0.14	6.3		0.082
7.9	0.20	14.9		0.062
4.0	0.09	—	脉动 测试	—
3.0	0.08	—		—
3.0	0.08	—		—
3.0	0.08	—		—
6.1	0.11	—		—
6.1	0.15	—		—
9.1	0.20	—		—
9.1	0.22	—		—
3.0	0.15	—		—
6.0	0.22	—		—
3.0	0.19	2.8	受迫 振动	—
6.0	0.23	4.8		—
6.0	0.38	6.6		—
3.0	0.21	4.4		—

4 北美地区轻型木结构房屋动力特性
实测及实验室研究成果

轻型木结构房屋在北美地区比较普遍,特别是住宅领域,该地区的许多研究者对轻型木结构房屋

的自振周期进行了许多现场实测及实验室研究. 文献[11]总结了一些轻型木结构房屋自振周期的研究成果,在这些研究中涉及的北美轻型木结构房屋自振周期约为 0.06~0.33 s,其中二层以上的房屋自振周期都大于 0.1 s. 文献[12]利用实际地震动、环境脉动、房屋受迫振动实测了一系列既有轻型木结构房屋的动力特性,结果列于表 4.

文献[13]利用振动台试验测试了一栋二层轻型木结构房屋(高为 6.1 m)在没有面层材料(6 号房屋)和有面层材料(主要是石膏板)时(7 号房屋)结构动力特性,测试分为 5 个阶段,峰值加速度逐渐加大,表 5 列出了不同峰值加速度下测得的房屋动力特性. 文献[14]利用房屋受迫振动测试了一栋三层轻型木结构房屋(高为 9.1 m)在没有面层材料(8 号房屋)和有面层材料时(9 号房屋)结构动力特性,结果也列于表 5 中.

表 5 轻型木结构房屋动力特性调查 2^[13-14]
Tab.5 Summary of dynamic characteristics of wood-frame constructions from literature review2^[13-14]

房屋编号	房屋高度/m	峰值加速度/g	自振周期/s	阻尼比/%
6	6.1	0.05	0.26	4.3
		0.22	0.27	4.2
		0.36	0.27	3.9
		0.5	0.34	7.2
		0.89	0.34	8.7
7	6.1	0.05	0.16	6.1
		0.22	0.16	11.5
		0.36	0.17	8.1
		0.5	0.18	7.4
		0.89	0.19	6.2
8	9.1	—	0.36	4.3
9	9.1	—	0.25	8.8

5 轻型木结构房屋动力特性的讨论

5.1 非结构构件对轻型木结构房屋自振周期的影响

轻型木结构房屋因消防要求,需在木框架剪力墙体一侧或两侧安装石膏板(一层或两层),因石膏板是脆性材料,抗剪强度低,一般在结构设计中不考虑其对结构承载力的贡献.

文献[15-19]利用单片木框架剪力墙研究了石

膏板对结构受力的影响,研究表明石膏板能使结构的初始刚度明显增加,如采用 40% 极限荷载时的割线刚度来衡量时,刚度增加约 50%^[19]. 文献[20]现场对一轻型木结构房屋面层材料(特别是石膏板)安装前后的抗侧刚度进行了研究,得出面层材料安装后房屋的抗侧刚度为之前的 4 倍. 以上研究表明,石膏板对轻型木结构的抗侧刚度有明显的影响,进而影响结构的自振周期.

动力测试得到的自振周期结果^[3,4,13]示于图 8 中,从图中可以看到,石膏板的存在使结构的刚度有明显增加(周期值变小),文献[14]的研究也可以得到类似结论;同济大学的试验结果还表明^[3-4],石膏板的存在使结构在地震过程中的刚度损失也变小.

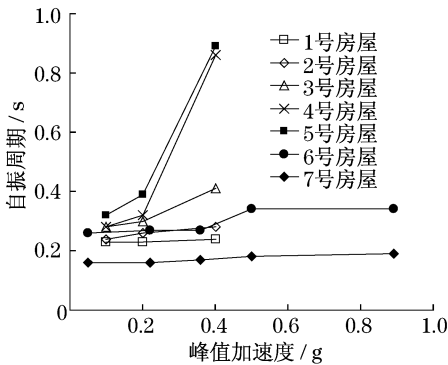


图 8 相同峰值加速度下有石膏板和无石膏板的轻型木结构房屋自振周期比较

Fig.8 Fundamental period comparison of wood-frame constructions with and without gypsum boards

5.2 轻型木结构房屋阻尼比的影响因素

实际结构在振动过程中往往是多种阻尼机制共同作用来消耗能量. 轻型木结构在较低位移水平时就表现出非常明显的非线性,地震动过程中,此类结构的耗能性能主要取决于钉连接节点的非线性变形. 在通常的设计与分析中采用等效阻尼比来代表结构在经历振动时的耗能能力. 规范^[1,2,6,10]建议值为 5%.

利用环境脉动测试得到向峨小学三栋轻型木结构校舍的阻尼比值范围在 0.52%~3.94%之间,小于规范 5% 的建议值. 通过与采用其他测试方法得到的轻型木结构房屋阻尼比相比可以发现,用不同测试方法得到的轻型木结构阻尼比是不同的,脉动方法测试得到的阻尼比最低,而利用实际地震动、模拟地震动及房屋受迫振动时测得的阻尼比较大,大部分值都非常接近或大于 5% 的规范建议值. 可以看到采用不同的测试方法进行测试时结构的振动幅值是

不同的,结构振动幅度较大,钉连接节点非线性变形所耗散的能量也就越多,因此阻尼比也越大.结构在地震作用下往往会经历较大幅值的变形,因此规范建议的阻尼比值是合理的.

图9是文献[13]中无面层材料和有面层材料情况下轻型木结构房屋模型阻尼比与峰值加速度的相互关系.

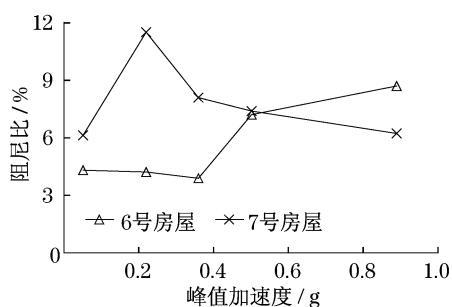


图9 相同峰值加速度下有石膏板和无石膏板的轻型木结构阻尼比比较

Fig.9 Damping ratio comparison of wood-frame constructions with and without gypsum boards

从图中可以看到,在峰值加速度达到0.5 g之前,有面层材料的轻型木结构房屋模型阻尼比要比明显比无面层材料的模型大,说明面层材料(特别是石膏板)参与了结构耗能.文献[14]中,有面层材料的轻型结构房屋模型受迫振动测得的阻尼比相比无面层材料的结构大也说明面层材料(特别是石膏板)参与了结构耗能.

5.3 设计建议

图10中所示有按我国规范^[1]和FEMA-273^[9]建议的轻型木结构房屋自振周期计算公式得到的周期与房屋高度关系曲线及本研究所调查的房屋自振

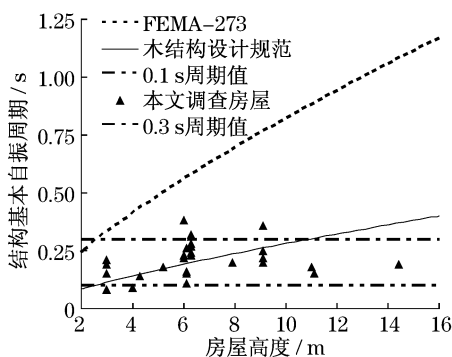


图10 实测轻型木结构自振周期值与规范建议公式计算值比较

Fig.10 Comparison of fundamental period obtained from tests and formula

周期测试值(除激励的峰值加速度 >0.1 g以外).从图10中可以看出,规范建议^[1,9]的仅与轻型木结构房屋高度相关的结构自振周期的计算公式并不能很好的预测结构实际的自振周期.但从图可以看出本研究所调查的房屋自振周期值基本位于0.1~0.3 s之间,验证了文献[5]建议的对于适用于我国的3层及以下轻型木结构房屋地震影响系数直接取最大值的合理性.

6 结论

在对向峨小学三栋轻型木结构校舍建筑动力特性现场测试的基础上,结合同济大学土木工程防灾国家重点实验室轻型木结构模拟地震振动台试验研究成果及相关国外文献的调查研究,对轻型木结构的自振周期及阻尼比进行了初步讨论,进一步论证了文献[5]的研究成果,此外还得到以下研究结论:

(1) 轻型木结构房屋中的石膏板对结构性能有明显的影 响,石膏板能提高结构的初始刚度,并且使结构在经历地震时刚度的损失减小,同时增加结构在地震时所耗散的能量;

(2) 轻型木结构房屋阻尼比测试值与结构经历的振动幅值有关,振动幅值越大,测得的阻尼比也越大;

(3) 调查了多栋轻型木结构房屋的阻尼比,利用实际地震、模拟地震或使房屋产生受迫振动时测得的大部分阻尼比值比较接近或超过规范建议值.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. GB 50005—2003 木结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2006.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50005—2003 Code for design of timber structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006.
- [2] 上海市工程建设规范. DG/TJ08—2059—2009 轻型木结构建筑技术规程[S].上海:[s. n.],2009.
Shanghai Engineering Construction Specification. DG/TJ08—2059—2009. Technical specification for wood frame construction [S]. Shanghai:[s. n.],2009.
- [3] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 二层轻型木结构房屋模拟地震振动台试验研究报告[R].上海:同济大学土木工程防灾国家重点实验室,2004.
State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering of Tongji University. Shaking table test report of two storey light frame wood house [R]. Shanghai: Tongji University. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, 2004.

- [4] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 二层不规则轻型木结构房屋模拟地震振动台试验研究报告[R]. 上海: 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 2005.
- State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering of Tongji University. Shaking table test report of irregular plan of two-storey light frame wood house [R]. Shanghai: Tongji University. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, 2005.
- [5] 熊海贝, 徐硕, 卢文胜. 轻木结构房屋基本自振周期试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 449.
- XIONG Haibei, XU Shuo, LU Wensheng. Test study of fundamental periods of wood-frame houses [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(4): 449.
- [6] International Conference of Building Officials. Uniform building code[S]. Whittier: California, 1997.
- [7] American Society of Civil Engineering. ASCE/SEI 7 - 05 Minimum design loads for buildings and other structures [S]. Washington D C: The America Society of Civil Engineering, 2006.
- [8] Canadian Commission on Building and Fire Code (CCBFC). National building code of Canada [S]. Ottawa: The National Research Council of Canada, 2002.
- [9] Federal Emergency Management Agency. FEMA - 273 NEHERP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [S]. Washington, D C: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [10] Federal Emergency Management Agency. FEMA - 302 NEHERP recommended provisions guidelines for seismic regulations for new buildings and other structures [S]. Washington, D C: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [11] Foliente G C, Zacher E G. Performance tests of timber structural systems under seismic loads[C]// Proceedings of a Research Needs Workshop on Analysis. Design and Testing of Timber Structures Under Seismic Loads. Richmond: University of California Forest Products Laboratory, 1994, 21 - 86.
- [12] Vanessa S C. Dynamic characteristics of wood frame buildings [D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2003.
- [13] Fischer D, Filiatrault A, Folz B. Shake table tests of a two-story wood-frame house. CUREE-caltech wood-frame project task 1.1.1 report [R]. Richmond: Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREE), 2001.
- [14] Mosalam K, Machado C, Gliniorz K U. Seismic evaluation of an asymmetric three-story wood-frame building. CUREE-caltech wood-frame project task 1.1.2 report [R]. Richmond: Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREE), 2002.
- [15] Wolfe R W. Research paper FPL - 439-contribution of gypsum wallboard to the racking resistance of light-frame walls[R]. Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Product Laboratory, 1983.
- [16] Karacabeyli E, Ceccotti A. Test results on lateral resistance of nailed shear walls [C]// 1996 Int Wood Engineering Conf, Baton Rouge: Louisiana State University, 1996.
- [17] Johnson A C. Monotonic and cyclic performance of long shear walls with openings [D]. Blacksburg Virginia: Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [18] Uang C M, Catto K. Effects of finish materials and dynamic loading on the cyclic response of wood-frame shear walls[J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 2003, 129(10): 1394.
- [19] Sinha A, Gupta R. Strain distribution in OSB and GWB in wood-frame shear walls [J]. Journal of Structure Engineering. ASCE, 2009, 135(6): 666.
- [20] 陈松来, 张盛东, 王焕定, 等. 轻型木结构房屋侧向变形机理的现场试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 451.
- CHEN Songlai, ZHANG Shengdong, WANG Huanding, et al. In situ experimental study of deformation mechanism under lateral loads for wood frame building [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(4): 451.